doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.12.018

芦山地震中相邻建筑碰撞破坏调查与分析

杨永强[1],戴君武[1],公茂盛[1],谢礼立[1,2]

(1. 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所),150080 哈尔滨;
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院,150090 哈尔滨)

摘 要:为研究相邻建筑地震碰撞破坏机理,调查了芦山地震中相邻建筑碰撞破坏概况,并应用芦山地震加速度记录计算了相邻建筑地震碰撞反应,分析了防震缝宽度和结构质量对碰撞作用的影响.研究结果表明:防震缝宽度越大碰撞对相邻建筑地震反应的影响越小;相邻建筑物质量相近时,地震动输入方向对相邻建筑物碰撞作用影响较小;相邻建筑碰撞对自振周期相对较长的建筑的地震反应影响较大;相邻建筑质量越大,碰撞对其加速度反应影响越小,并且碰撞对质量相对较小的建筑加速度反应影响较大;本文对相邻建筑物碰撞作用的分析与震害实例基本相符.

关键词:芦山地震;相邻建筑;碰撞;地震反应;防震缝

中图分类号:TU398 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2015)12-0102-04

Investigation andanalysis on adjacent buildings pounding damage in Lushan earthquake

YANG Yongqiang[1], DAI Junwu[1], GONG Maosheng[1], XIE Lili[1,2]

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration (Institute of Engineering Mechanics), CEA, 150080 Harbin, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: A survey of adjacent buildings pounding damage caused by the Lushan earthquake is presented in this paper. Used the acceleration records from Lushan earthquake, the seismic response of adjacent buildings considering collision is calculated, and the influence of seismic joint width and building mass to the collision process is analyzed. Conclusions are as follows: the wider the seismic joint between adjacent buildings, the less and slighter the pounding; there is little effect of ground motion direction on the collision damage between adjacent buildings; the influence of pounding to the building seismic response become slight with the increase of building mass, and the influence is larger to the lighter building; analysis results about adjacent buildings collision in this paper are in conformity with the typical pounding damage example.

Keywords: Lushan earthquake; adjacent buildings; pounding; seismic response; seismic joint

相邻结构碰撞是指地震作用下相邻建筑之间的侧向撞击,由于相邻建筑动力性能的差异导致了地震时的非同步振动,当建筑间距无法满足这种振动状态要求时,就会产生碰撞,由此造成相邻结构的破坏和倒塌[1-2].相邻建筑物碰撞一般都会造成相邻建筑物的局部破坏,严重的甚至能导致建筑主体结构破坏引起建筑倒塌.1985 年墨西哥地震震害调查表明,被调查的 330 幢倒塌和受严重破坏建筑物中 40%以上严重破坏建筑物和 15% 的倒塌建筑物发生过碰撞[3].此后,相邻建筑物地震碰撞破坏引起重视,国外对相邻建筑碰撞进行了较多研究,主要有碰撞动力学法[4-5]和接触单元法[6-8]两种数值模拟方法.2008 年汶川地震和 2010 年玉树地震中碰撞造成的相邻建筑破坏现象在高烈度区非常普遍.为此,中国建筑抗震设计规范将砌体房屋的防震缝宽度最小值从 50 mm 提高到了 70 mm[9-10].

本文将依据芦山地震现场调查结果,分析碰撞对结构地震反应的影响,结合典型碰撞破坏实例,验证分析结果.

收稿日期:2014-08-14.
基金项目:国家自然科学基金(51308516);黑龙江省自然科学基金(E201460);国家国际科技合作专项项目(2012DFA70810).
作者简介:杨永强(1983—),男,博士,副研究员;
戴君武(1967—),男,研究员,博士生导师;
谢礼立(1939—),男,博士生导师,中国工程院院士.
通信作者:杨永强,yangiem@foxmail.com.

1　震害调查概况

2013 年 4 月 20 日 08 时 02 分 46 秒，在四川省雅安市芦山县（北纬 30.3°，东经 103.0°）发生 M7.0 级地震，造成大量建筑发生破坏.作者作为地震应急与灾害评估队员，参与调查了不同烈度区的结构破坏情况.在高烈度区（Ⅷ度区和Ⅸ度区）相邻建筑碰撞现象较为普遍，尤其是临街建筑，主要原因是临街建筑的防震缝宽度不足或没有.

2　相邻建筑物地震碰撞作用分析

为分析碰撞对结构地震反应的影响，需要知道考虑碰撞时的相邻建筑最大地震反应，参照反应谱的计算思路，本文将相邻建筑简化为相邻单自由度体系，见图 1.参考文献[11]中碰撞力反应谱的概念，定义碰撞反应谱为一系列不同周期（T_1 和 T_2）的相邻单自由度体系，在某一地震动作用下最大反应的绝对值与两个单自由度体系的周期组成的曲面.碰撞反应谱的谱值与建筑物本身特性、间距以及输入地震动相关，因此可表示为

$$R_{\max}(T_1,T_2,m_1,m_2,\xi_1,\xi_2,d,A_{g1},A_{g2}) = \max_t |R(t,T_1,T_2,m_1,m_2,\xi_1,\xi_2,d,A_{g1},A_{g2})|. \quad (1)$$

式中：T、m、ξ 分别为结构的自振周期、质量和阻尼比，d 为相邻建筑间距，A_g 为输入地震动.

假定图 1 所示相邻单自由度体系之间的碰撞力为 F_c，则其动力方程可表示为

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_c(t) \\ -F_c(t) \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{x}_{g1}(t) \\ \ddot{x}_{g2}(t) \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

式中：m、C、K 分别为结构的质量、阻尼和刚度，$\ddot{x}$、$\dot{x}$、x、$\ddot{x}_g$ 分别为结构的水平加速度、速度、位移和输入地震动，接触单元模型选取 Hertz-damp 模型，F_c 的表达式参考文献[12-13].

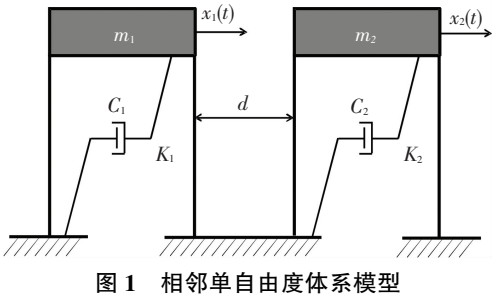

图 1　相邻单自由度体系模型

2.1　地震动选取

为体现芦山地震地面运动特征对结构反应的影响，选取此次地震中幅值大于 100 gal 的 15 组地震动的水平分量进行相邻建筑物碰撞分析.考虑到本次地震中相邻建筑碰撞普遍发生在Ⅷ度和Ⅸ度区，故将地震动幅值统一调整为400 gal.

2.2　防震缝宽度 *d* 的影响

根据震害调查结果，震区多数临街建筑的防震缝宽度 d 不足，本文取有代表性的 5 个宽度：①d = 10 mm，防震缝宽度严重不足；②d = 30 mm，防震缝宽度不足；③d = 50mm，2001 版抗震规范建议砌体结构防震缝宽度最小值；④d = 70 mm，2010 版抗震规范建议砌体结构防震缝宽度最小值；⑤d = 100 mm，2010 版抗震规范建议砌体结构防震缝宽度最大值.假定单自由度体系质量均为 300 t，计算结果见图 2.

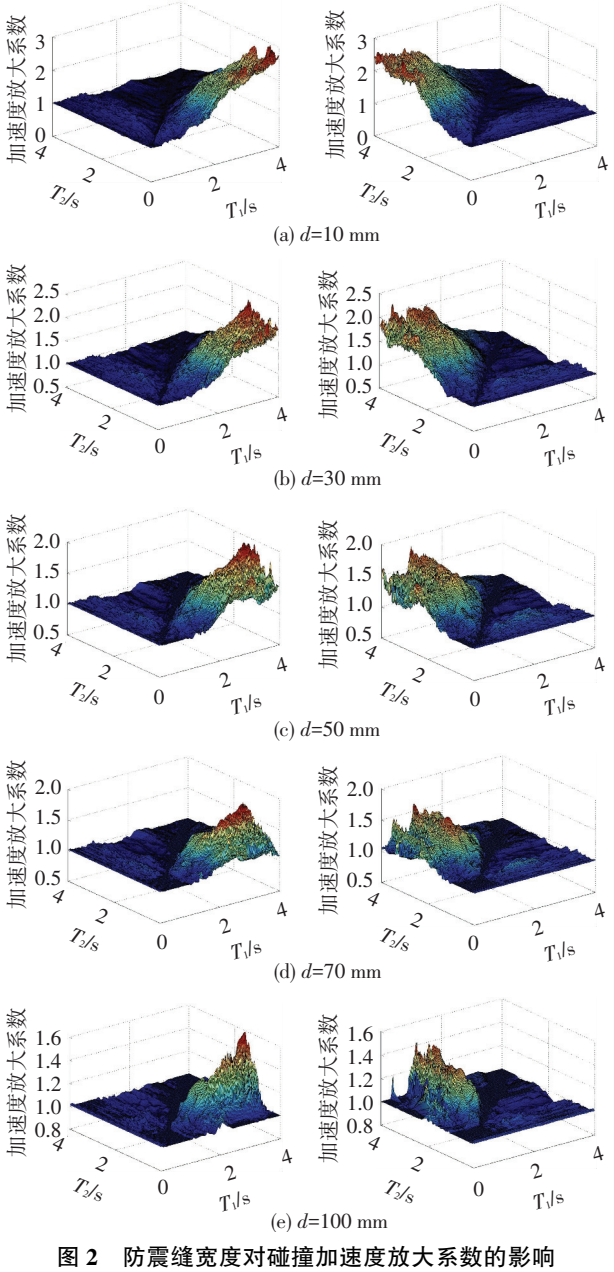

图 2　防震缝宽度对碰撞加速度放大系数的影响（左：结构 1，右：结构 2）

防震缝宽度越小碰撞对相邻建筑地震反应的放

大作用越大,当防震缝宽度从10 mm变为 100 mm时,两个结构的加速度放大倍数最大值均降至原来的 1/2 左右,并且不发生碰撞的周期范围越来越大;结构 1 和结构 2 的碰撞放大系数曲面基本呈反对称,说明地震动输入方向对碰撞作用的影响不大.从单个碰撞放大系数曲面来看,在弹性范围内,若不考虑行波效应,并且相邻建筑高度和自振周期相同时,两者振动同步,无碰撞;相邻体系中周期相对较长结构的地震反应受碰撞影响较大,并且周期差别越大,两者的碰撞加速度放大系数差别越大.

2.3　结构质量的影响

为研究质量对碰撞作用的影响,计算了 $m_1=300$ t,而 m_2分别为 60、100、300、900、1 500 t 时的碰撞放大系数曲面,防震缝宽度取震区常见值 50 mm,结果见图 3.

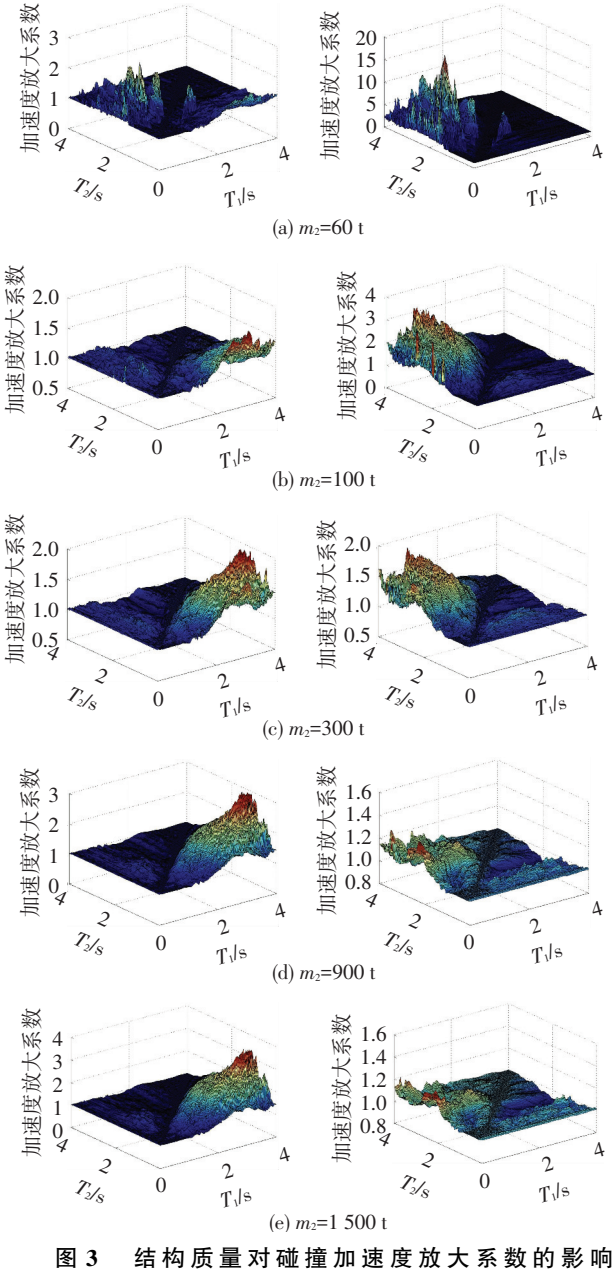

图 3　结构质量对碰撞加速度放大系数的影响(左:结构 1,右:结构 2)

随着结构 2 质量增加,碰撞对结构 1 地震反应的放大作用基本由小到大,而对结构 2 地震反应的放大作用则是由大到小,说明相邻建筑发生碰撞时,对质量小结构的影响较大;结构 1 的加速度放大系数最大值约增大 2 倍,而结构 2 的加速度放大系数最大值则降低到 1/12 左右.

对比图 3(a)、(e)、(b)、(d)可以发现,这两组计算模型的质量比分别为 5∶1 和 1∶5、3∶1 和 1∶3,质量比互为倒数,但计算结果并不存在对应关系,这说明碰撞对相邻建筑地震反应的影响不仅与相邻建筑的质量比相关还与其本身质量大小相关,质量越大受碰撞影响越小.

上述结论基于弹性反应谱分析得出,当遭受较大地震作用时,结构会产生塑性变形,此时相邻建筑物的相对位移变大,基本自振周期延长,发生碰撞的概率增大.此外,相邻建筑物的延性不同也会致使自振周期相同的相邻建筑发生碰撞,因此本文计算结果会低估相邻建筑物发生碰撞的概率.

3　相邻建筑碰撞破坏典型实例

图 4 所示为芦山县宝盛乡凤头村某相邻砖混结构民居,左侧为 3 层砖混结构(相当于图 1 的结构 1),右侧为 2 层砖混结构(相当于图 1 的结构 2),两者间距约 50 mm.建筑 1 破坏较轻,其第二层横墙由于撞击作用在碰撞高度发生严重破坏,但为局部破坏,房屋其它墙体仅有轻微裂缝,结构破坏等级为中等破坏;建筑 2 的内纵墙产生严重剪切斜裂缝,第一层横墙在撞击作用下发生错断,倾靠在建筑 1 上,可定义为倒塌,破坏等级为毁坏.

依据文献[14]中的砌体结构基本周期计算公式,并考虑墙体厚度影响,估计建筑 1 和建筑 2 的基本自振周期为 0.25~0.30 s,建筑 1 的基本自振周期略小于建筑 2.另外,根据调查资料估计,建筑 1 的质量大约为 300 t,建筑 2 的质量约为 100 t.

实例中相邻建筑物的总高及各层楼板标高存在较大差别,并且由第二节分析可知在较大地震作用下,这两个建筑的破坏程度不同、延性不同等因素共同影响下,即使两个建筑物基本自振周期相近仍然会发生碰撞.由图 3(b)可知,碰撞对建筑 2 的地震反应放大作用明显大于对建筑 1 的放大作用,并且建筑 2 的抗震性能明显低于建筑 1,因此,建筑 2 会先发生破坏.建筑 2 发生破坏后,其自振周期会明显变长,此时再由图 3(b)中的模拟结果可知,碰撞对建筑 2 的放大作用会随其自振周期变长而增加,由此在地震和碰撞的共同作用下造成了建筑 2 的毁坏.上述分析表明,基于弹性反应谱分析的结果仍然

可以解释实际震害成因,可供震害分析参考.

(a) 外观

(b) 建筑2的第二层纵墙

(c) 建筑2的第一层横墙错断

(c) 建筑1的第二层山墙局部破坏

图 4　相邻建筑碰撞典型实例

4　结　论

1)防震缝宽度越大碰撞对相邻建筑地震反应的放大作用越小,当 PGA 为 0.4 g 时,防震缝宽度从 10 mm 增加到 100 mm,碰撞加速度放大系数最大值约降低一半.

2)当相邻建筑物质量相近时,地震动输入方向对碰撞作用的影响较小.

3) 碰撞对相邻建筑中周期长的结构的地震反应影响较大.

4) 相邻建筑质量越大碰撞对其加速度反应影响越小;碰撞对相邻建筑中质量相对较小的建筑加速度反应影响较大.

5) 基于弹性反应谱进行分析会低估相邻建筑物发生碰撞的概率.

6) 对相邻建筑物碰撞作用的分析结果与芦山地震中相邻砖混结构民居震害实例基本相符.

致谢:文中加速度记录数据由国家强震动台网中心提供,在此表示感谢.

参考文献

[1] ANAGNOSTOPOULOS S A, SPILIOPOULOS K V. An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21(4): 289 -302.

[2] MAISON B F, KASAI K. Dynamics of pounding when two buildings collide [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21(9): 771-786.

[3] KASAI K, MAISON B F. Building pounding damage during the 1989 Loma Prieta earthquake [J]. Engineering Structures. 1997, 19(3): 195-207

[4] PAPADRAKAKIS M, MOUZAKIS H, PLEVRIS N, BITZARAKIS S. A lagrange multiplier solution method for pounding of buildings during earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1991, 20(11): 981-998.

[5] ATHANASSIADOU C J, PENELIS G G, KAPPOS A J. Seismic response of adjacent buildings with similar or different dynamic characteristics[J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(2): 293-317.

[6] JANKOWSKI R. Non-linear viscoelastic modeling of earthquake-induced structural pounding[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34(6): 595-611.

[7] JANKOWSKI R. Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39(3): 343-354.

[8] MAISON B F, KASAI K. Analysis for type of structural pounding[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(4): 957-977.

[9] GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2008.

[10] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2010.

[11] JANKOWSKI R. Pounding force response spectrum under earthquake excitation[J]. Engineering Structures, 2006, 28(8): 1149-1161.

[12] YE Kun, LI Li, ZHU Hongping. A note on the Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009, 38(9):1135-1142.

[13] MUTHUKUMAR S, DESROCHES R. A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(7): 811-828.

[14] 周洋, 施卫星, 韩瑞龙. 多层大开间砌体结构的基本周期实测与分析[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 197-203.

(编辑　赵丽莹)